

居住建筑采暖期前后人体适应性热舒适比较

郑武幸¹, 杨柳¹, 闫海燕², 宋晓吉¹

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 河南理工大学建筑与艺术设计学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了解居住建筑采暖期前后人体适应性热舒适的差异, 采取现场热舒适的研究方法, 对以西安为代表的寒冷地区采暖期前后人体热感觉、主要行为调节方式、中性温度以及自适应水平四个方面进行了比较分析。结果显示: 采暖期后热感觉敏感度大于采暖期前; 采暖期前人们随室温变换着装的敏感度大于采暖期后; 中性温度受室内温度、室内热经历以及气温渐变趋势综合影响; 采暖期后人体自适应水平较采暖期前低。

关键词: 采暖期前后; 热感觉; 适应性调节; 中性温度; 自适应水平

中图分类号: TU119

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)06-0871-05

国内众多的热舒适现场试验证明, 人们对室内热环境的实际热感觉 (AMV) 与人工气候室应用稳态热平衡的方法建立的 PMV 之间存在差异^[1-2]。研究表明, 这样的差异主要原因是人对气候的行为适应性及心理期望值^[3]。国内适应性热舒适的研究多集中在冬季采暖期和夏季空调期, 对于非采暖空调环境下适应性热舒适研究较少^[4]。对于采暖期前 (Before heating period, BHP) 和采暖期后 (After heating period, AHP) 这样的非采暖空调状态而言, 人体的舒适性完全依靠行为调节、生理习服和心理适应^[5-6]等适应性方式进行调节。然而, 虽然同样处于这种非采暖空调状态下的过渡季节, 但采暖期前由秋季向冬季过渡, 气候特征主要表现为气温逐渐降低, 采暖期后气温逐渐升高, 再加之由于刚结束采暖, 人们有温暖的室内热经历, 人体适应性在这样的情况下是否会表现出差异? 如果差异存在, 那么表现在哪些方面呢? 文章将从热感觉、主要行为调节方式、中性温度以及自适应水平四个主要方面进行比较分析, 以期揭示其中的差异和规律所在。

1 调查方法及统计结果

1.1 调查方法

本次现场调查选择在我国寒冷地区代表城市西安进行, 对居住建筑采暖期前后这两个过渡季进行了人体热舒适的连续测试和调查, 分别获取 230 组组合 135 组有效数据。室内外环境参数测试和主观问卷同时进行, 测试时间在每天的早 (7:30~11:00)、中 (11:00~14:00)、晚 (14:00~19:00) 三个时段。

表 1 受试者资料统计表

Tab.1 Conditions of individuals

项目	最小值	最大值	平均值	标准偏差
年龄/岁	21	34	25.2	2.92
身高/cm	150	190	170.7	9.51
体重/kg	41	81	63.6	12.69
服装热阻 I_{cl}/clo	0.454 7	1.601 4	1.002 2	0.26

现场数据采集主要包括室内环境参数测试和室外环境参数测试, 室内环境参数测试主要使用 1221 型室内热舒适度数据记录仪, 室外环境参数测试主要使用 JZH-1 室内外环境监测系统, 对室内外空气温度、相对湿度、风速和黑球温度分别进行测量, 其精度和响应时间均满足 ISO 7726-2002^[7]标准。

热舒适主观问卷调查内容包括: 受试者基本情况 (如年龄、身高、体重、衣着状况等)、人体热感觉和热舒适度调查、受试者改善室内热环境的措施 (如加减衣物、开关门窗等) 以及对室内热环境的满意度。

1.2 调查结果统计

本次调查的受试人员共 96 人次, 其中: 男性 64 人次 (66.7%), 女性 32 人次 (33.3%), 年龄在 21~34 岁之间, 平均年龄为 25.7 岁, 统计结果见表 1, 表中的服装热阻是根据文献^[8-9]进行附加修正后的值。室内外环境参数见统计表 2, 采暖期前后室外空气温度日变化较大, 室内热环境则随之相应变化, 变化幅度较之室外小, 采暖期后室内平均温度较采暖期前普遍高; 采暖期后室内相对湿度较采暖期前普遍低。

由于室内风速很小, 整个测试期间平均值约为 0.07 m/s, 对人体热舒适影响很小, 下文进行相关分析时将不考虑风速对热舒适的影响; 有效温度 t_{op} 是综合考虑了空气温度和平均辐射温度对人体热感觉的影响而得出的合成温度^[10], 下文将采用操作温度 t_{op} 作为热舒适指标, 其值近似等于空气温度 t_a 与平均辐射温度 t_{mrt} 的平均值^[10], 其中 t_{mrt} 可根据下面公式^[11]计算得出:

收稿日期: 2014-06-24

修改稿日期: 2014-11-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (51325803); 国家自然科学基金项目 (51408198); 陕西省重点科技创新团队项目 (2012KCT-11)

作者简介: 郑武幸 (1983-), 男, 博士研究生, 主要从事建筑气候与节能方面的研究。E-mail: zwx124@126.com

$$t_{\text{mrt}} = t_g + 2.4v^{0.5}(t_g - t_a)$$

式中: t_g 为室内黑球温度, $^{\circ}\text{C}$; v 为空气流速, m/s .

(1)

表 2 室内外热环境参数统计表

Tab.2 Conditions of indoor and outdoor thermal environment

参数			最小值	最大值	平均值	标准偏差
空气温度 $t_a/^{\circ}\text{C}$	室内	BHP	11.7	22.3	18.2	2.05
		AHP	17.1	27.1	21.2	1.53
	室外	BHP	6.3	25.6	15.1	4.52
		AHP	9.1	32	19	5.93
相对湿度 $RH/\%$	室内	BHP	22	62.4	41.1	9.09
		AHP	13	38	24.6	5.24
	室外	BHP	35.1	75.3	52.4	10.47
		AHP	30.6	70.7	47.3	8.24
风速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	室内	BHP	0	0.21	0.07	0.05
		AHP	0	0.3	0.06	0.05
	室外	BHP	0.01	1.06	0.17	0.2
		AHP	0	1	0.1	0.22
黑球温度 $t_g/^{\circ}\text{C}$	室内	BHP	12.2	22.1	18.1	1.99
		AHP	17.2	23.6	21	1.44
	室外	BHP	6.6	30.2	16.3	5.24
		AHP	9.8	36.1	20.2	6.55

2 结果分析

2.1 热感觉比较分析

热感觉是人们对所处环境冷热最直接的心理反应,热感觉的大小可间接反映出环境的冷热情况.根据对采暖期前后室内热环境舒适度(3 非常舒适,2 很舒适,1 比较舒适,0 适中,-1 不太舒适,-2 不舒适,-3 非常不舒适)进行统计(如图 1),结果显示分别有 76.1% (BHP) 和 92.5% (AHP) 的人群认为室内热环境是舒适的(舒适度 ≥ 0).在这样一个大部分人感觉舒适的环境下,这两个时期人的热感觉是否存在差异呢?

对两个时期受试者的热感觉按照 ASHRAE 55 的 7 级热感觉标度(+3 很热,+2 热,+1 微热,0 中性,-1 微冷,-2 冷,-3 很冷)进行统计,采用温度频率法^[7]对平均热感觉 MTS 和预测平均热感觉 PMV 分别与操作温度 t_{op} 进行线性回归分析,结果见图 2,线性回归方程式(2)~(5).由图 2 可见, MTS 曲线与 PMV 曲线均存在不同程度偏离,且采暖期前偏离程度大于采暖期后;采暖期后人们的实测热感觉与预测热感觉相当接近,且不论是 PMV 曲线还是 MTS 曲线,采暖期后的人感觉敏感度均大于采暖期前.分析导致这样的差异出现的原因,不仅与室外气候的整体冷暖情况和气温渐变过程的差异有关,也与不同的室内热经历引起的生理差异密不可分.

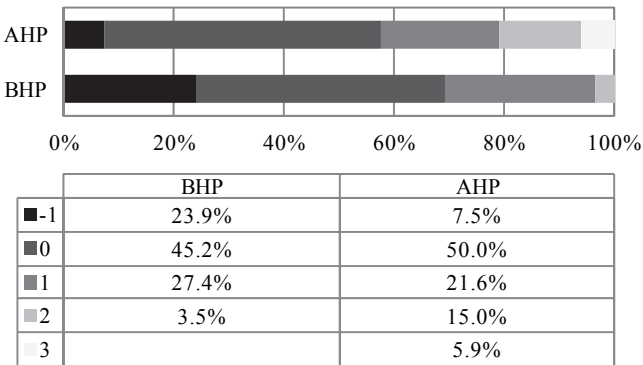


图 1 热舒适度调查结果
Fig.1 Results of thermal comfort scale

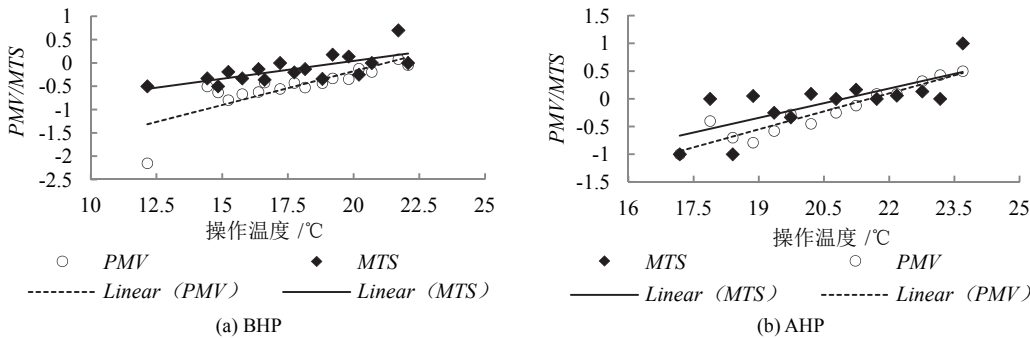


图 2 室内操作温度 t_{op} 与 MTS 、 PMV 的关系
Fig.2 Relationship between t_{op} against MTS and PMV

$$MTS_{\text{BHP}} = 0.076t_{\text{op}} - 1.485 \quad (R^2 = 0.512)$$

(2)

$$PMV_{BHP}=0.144t_{op}-3.072 \quad (R^2=0.680)$$

(3)

$$MTS_{AHP}=0.176t_{op}-3.696 \quad (R^2=0.536)$$

(4)

$$PMV_{AHP}=0.216t_{op}-4.662 \quad (R^2=0.902)$$

(5)

2.2 行为调节方式比较分析

在 Brager 和 de Dear 提出的三种人体热适应调节方式中, 行为调节是人体适应热环境变化最直接的表现. 通过问卷调查分析, 在此两段时期不使用采暖设备的前提下, 采暖期前和后分别有 89.1 %和 92.4 %的受试者采用增加(减少)着衣量的主动行为调节方式来适应热环境的变化. 由此可见, 采暖期前后着衣量是人体热适应最主要也是最习惯的行为调节方式.

根据统计分析, 采暖期前受试人员服装热阻 I_{cl} 平均为 1.11 clo, 最大值为 1.60 clo, 最小值为 0.60 clo, 从图 3 中可以看出, 多分布在 0.9~1.3 clo 之间; 采暖期后服装热阻平均为 0.94 clo, 最大值为 1.43 clo, 最小值为 0.56 clo, 多分布在 0.7~1.1 clo 之间. 服装热阻的这种差异, 是人体对环境温度变化采取行为适应的具体体现, 与室内热环境密切相关, 也恰好是采暖期后室内平均温度整体大于采暖期前的表现. 利用统计学方法对着衣量与相关参数进行统计分析, 发现采暖期前后室内操作温度和服装热阻之间均存在很好的线性相关性, 见图 4, 其线性回归方程为式 (6) 和式 (7).

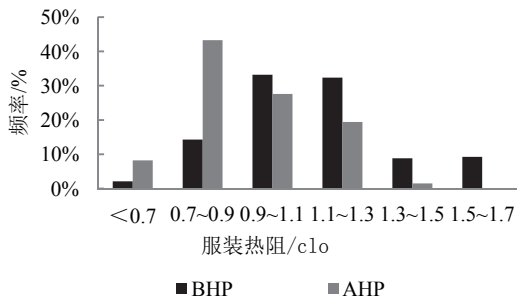


图 3 服装热阻分布频率

Fig.3 I_{cl} and frequency distribution

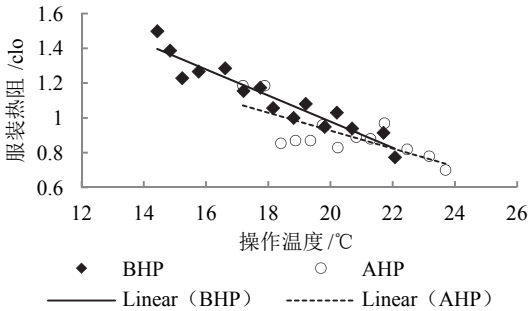


图 4 服装热阻与室内操作温度关系

Fig.4 Relationship between I_{cl} and t_{op}

由两方程的斜率可知, 采暖期前人们的服装热阻随室内操作温度的变化率大于采暖期后, 这说明在较冷的采暖开始前人们对冷的感觉更明显, 在经历一个采暖季这种热经历后, 这种感觉的变化明显变小, 笔者认为这是由于气温的逐渐升高, 人体生理上对热的注意力开始抵消生理上对冷的感觉造成的.

$$I_{cl}=-0.075t_{op}+2.4785 \quad (R^2=0.9039) \quad (\text{采暖期前})$$

(6)

$$I_{cl}=-0.0515t_{op}+1.9556 \quad (R^2=0.551) \quad (\text{采暖期后})$$

(7)

式中: I_{cl} 为服装热阻, clo; t_{op} 为操作温度, °C; R^2 为相关系数.

2.3 中性温度比较分析

中性温度为人体热感觉最适中时的温度, 可分为实测热中性温度和预测热中性温度^[12], 可以直接反应人们感觉舒适时的热需求. 当 $MTS=0$ 时, 可得出实测热中性温度, 当 $PMV=0$ 时, 可得到预测热中性温度. 根据式 (2) ~ (5) 分别求得中性温度见表 3.

对比发现如下几个差异: (1) 采暖期后实测和预测中性温度很接近, 相差 0.6 °C, 而采暖前两者相差 1.8 °C; (2) 两个时期实测和预测中性温度相差都不大, 分别为 0.7 °C 和 0.5 °C; (3) 采暖期前实测及预测中性温度分别高出室内操作温度平均值 1.5 °C 和 2.3 °C, 而采暖期后这两个值分别为 0.3 °C 和 0.9 °C. 产生这样差异的原因有: (1) 采暖期后室内温度普遍较之前高, 人们心理上对环境的期望值则较高, 导致采暖期后实测和预测中性温度均高于采暖期前, 但两个时期中性温度间的差异明显小于室内温度间的差异, 这也反过来说明室内温度的高低对中性温度有影响, 但不是唯一的, 室内热经历及气温的逐渐变化趋势是影响这种差异的另一个重要原因; (2) 在没有采暖这种热经历前, 人们对冷的适应能力更强, 表现为采暖开始前实测中性温度比预测值低 1.8 °C, 而采暖期后这种差异只有 0.6 °C.

2.4 自适应水平比较分析

国内外众多热舒适现场研究表明, 人体因受诸如气候、文化、社会、心理等很多因素影响, 而对所处

表 3 中性温度
Tab.3 Neutral temperature

	采暖期前	采暖期后
操作温度平均值/°C	18.0	20.9
中性温度/°C	实测	21.2
	预测	21.8

热环境具有一定的适应性. 不同气候类型下人体表现出来的气候适应规律及适应水平不同, 不同季节也存在差异. 为衡量这种适应水平, 有学者特此提出了“自适应系数”的概念. 姚润明^[13]基于“黑箱理论”, 综合考虑了这些因素后提出了“预计适应性平均热感觉指标”(aPMV), 并建立了相应的适应模型, 在模型中首次引入了自适应系数 λ . λ 可反映如行为调节、心理调节等适应作用, 当 $\lambda=0$ 时, $aPMV=PMV$, 即认为人体未采取适应行为; $\lambda>0$ 时, 表示在温度较高时 AMV 比 PMV 小, $\lambda<0$ 时表示在温度较低时 AMV 比 PMV 大, 不同的 λ 值可反映出人体采取了不同水平的自适应调节. 印度学者 Manoj Kumar Singh 等人^[14]针对印度不同气候区和不同季节, 分别计算了当地四季的自适应系数 λ , 结果表明各 λ 值不同.

我国《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T 50785-2012^[15]在评价非人工冷热源热湿环境评价中, 便应用姚润明提出的 $aPMV$ 作为评价指标, 并给出了相关的 λ 值, 对于寒冷地区居住类建筑, 该值分别为0.24 ($PMV \geq 0$)和-0.50 ($PMV < 0$). $aPMV$ 和 PMV 之间存在式(8)的关系:

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda \times PMV} \quad (8)$$

那么对于我国寒冷地区而言, 四季分明, 对于采暖期前后这两个同为过渡季节但气温渐变过程相反的两个时期而言, 人体适应水平是否存在差异? 这就需要借助上述自适应系数 λ 来判断. 利用文献[13]的方法, 可分别计算出西安采暖期前 $\lambda_{BHP} = -0.38$ ($PMV < 0$), 采暖期后 $\lambda_{AHP} = -1.24$ ($PMV < 0$). 显然, 两者存在较大差异, 说明在这样两个气温渐变过程相反的过渡季节中, 人体自适应水平存在差异, 采暖期后自适应水平较采暖期前低, 且与标准中给出的 $\lambda = -0.50$ ($PMV < 0$)比较, 采暖期后与之存在较大差异. 各自的自适应模型见式(9)~(10), 采暖期前后 PMV 、 MTS 和 $aPMV$ 的关系见图5.

$$aPMV = \frac{PMV}{1 - 0.38 \times PMV} \quad (\text{采暖期前}) \quad (9)$$

$$aPMV = \frac{PMV}{1 - 1.24 \times PMV} \quad (\text{采暖期后}) \quad (10)$$

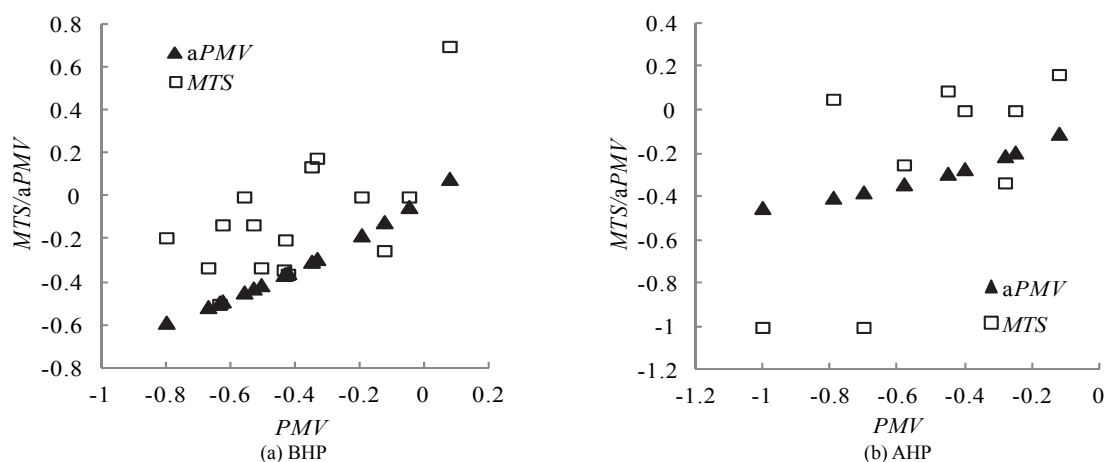


图5 PMV 、 MTS 和 $aPMV$ 的关系

Fig.5 Relationship between PMV , MTS and $aPMV$

3 结论

通过对我国寒冷地区代表城市西安居住建筑采暖期前后人体适应性热舒适现场测试结果分析, 可得出以下结论:

(1) 采暖期前后实测人体热感觉变化的敏感系数实测时分别为0.076 (BHP)和0.0176 (AHP), 预测时分别为0.144 (BHP)和0.216 (AHP), 这样的差异不仅与室外气候的整体冷暖情况和气温渐变过程的差异有关, 也与不同的室内热经历引起的生理差异密不可分;

(2) 采暖期前后人们热适应调节的主要方式虽然同为增加(减少)着衣量, 但采暖期前人们随室温变换着装的敏感度大于采暖期后, 敏感度分别为 $-0.075 \text{ clo}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.0515 \text{ clo}/^{\circ}\text{C}$, 这说明在较冷的采暖开始前人们对冷的感觉更明显, 在经历一个采暖季这种热经历后, 加之室外气温逐渐升高, 人体生理上对热的注意力开始抵消生理上对冷的感觉;

(3) 采暖期前实测和预测中性温度分别为 19.5°C 和 21.3°C , 两者相差 1.8°C , 且实测及预测中性

温度分别高出室内操作温度平均值 1.5°C 和 2.3°C ;采暖期后实测和预测中性温度分别为 21.2°C 和 21.8°C ,两者相差 0.6°C ,且实测及预测中性温度分别高出室内操作温度平均值 0.3°C 和 0.9°C ;采暖期前后实测和预测中性温度相差均不大.这样的差异说明室内温度的高低对中性温度有影响,但不是唯一的,室内热经历及气温的逐渐变化趋势是影响这种差异的另一个重要原因;

(4)根据自适应的相关理论和计算方法,采暖期前后的自适应系数 $\lambda(PMV<0)$ 分别为 -0.38 和 -1.24 ,两者较为明显的差异说明人们的自适应水平存在差异,且采暖期后自适应水平较采暖期前低,采暖期后与国家标准^[15]中给定的严寒寒冷地区居住建筑自适应系数 $\lambda=-0.50(PMV<0)$ 差异较明显,因此在做室内热湿环境评价时需考虑气候的季节性对判定结果的影响.

参考文献 References

- [1] FANGER P O, TOFTUM J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm and humid climates[J]. Energy Build 2002, 34(6): 533-536.
- [2] NICOL F, HUMPHREYS M. Derivation of the thermal equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251[J]. Build Environ 2009, 45(1): 11-17.
- [3] HUMPHREYS M. Outdoor temperatures and comfort indoors[J]. Building Research and Practice, 1978, 6(2): 92-105.
- [4] 屈万英, 闫海燕, 杨柳,等. 西安地区过渡季人体热舒适气候适应模型研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 51-56.
QU Wanying, YAN Haiyan, YANG Liu, et al. Study on climate adaptation model for human thermal comfort in Xi'an in transition seasons[J]. Building Science, 2014, 30(2): 51-56.
- [5] BRAGER G S, de DEAR R J. Thermal adaptation in the built environment: a literature review[J]. Energy and Buildings, 1998, 27(1): 83-96.
- [6] 张宇峰, 赵荣义. 建筑环境人体热适应研究综述与讨论[J]. 暖通空调, 2010, 40(9): 38-48.
ZHANG Yufeng, ZHAO Rongyi. Literature review and discussion on human thermal adaptation in built environment[J]. HV&AC, 2010, 40(9): 38-48.
- [7] ISO 7726-2002 Thermal environments specifications relating to appliances and methods for measuring physical characteristics of the environment[S]. Geneva: ISO, 2002.
- [8] MCCULLOUGH E A, OLESEN B W, HONG S. Thermal insulation provided by chairs[J].ASHRAE Transactions. 1994, 100(1): 795-802.
- [9] YANG Liu, YAN Haiyan, XU Ying, et al. Residential thermal environment in cold climates at high altitudes and building energy use implications[J]. Energy and Buildings, 2013, 62: 139-145.
- [10] 王昭俊. 现场研究中热舒适指标的选取问题[J]. 暖通空调, 2004, 12: 39-42.
WANG Zhaojun. Selection of thermal comfort indexes in the field study[J]. HV&AC, 2004, 34(12): 39-42.
- [11] 杨柳. 建筑气候学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 59.
YANG Liu. Bioclimatic Architecture[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 59.
- [12] 闫海燕, 杨柳. 焦作夏季居住建筑人体舒适现场研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(4): 96-103.
YAN Haiyan, YANG Liu. Field study on occupant thermal comfort in residential buildings of Jiaozuo city in summer[J]. HV&AC, 2012, 42(4): 96-103.
- [13] YAO Runming, LI Baizhan, LIU Jing. A theoretical adaptive model of thermal comfort-Adaptive Predicted Mean Vote(aPMV)[J]. Building and Environment, 2009, 44(10): 2089-2096.
- [14] SINGH M K, MAHAPATRA S, ATREYA S K. Adaptive thermal comfort model for different climatic zones of North-East India[J]. Applied Energy, 2011, 88: 2420-2428.
- [15] GB/T 50785-2012 民用建筑室内热湿环境评价标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB/T 50785-2012 Evaluation standard for indoor thermal environment in civil building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.

A comparative analysis of human adaptive thermal comfort in residential buildings circa heating period

ZHENG Wuxing¹, YANG Liu¹, YAN Haiyan², SONG Xiaoji¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. College of Architecture and Art Design, Henan Polytechnic Univ., Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to find out the difference of human adaptive thermal comfort before heating period (BHP) and after heating period (AHP) in residential buildings, thermal comfort field studies were carried out, and human thermal sensation, main behavioral adjustment, neutral temperature and adaptive level were analyzed between BHP and AHP of Xi'an, which is the representative of cold climate zone of China. The results show that thermal sensation sensitivity of AHP is greater than BHP. The sensitivity of changing dress along with indoor temperature is greater in BHP than AHP. Neutral temperature is under the comprehensive influence of indoor temperature, past indoor thermal experiences and outdoor temperature gradient trend. The human adaptive level of AHP is lower than BHP.

Key words: BHP and AHP; thermal sensation; adaptive approaches; neutral temperature; level of adaptations

(本文编辑 桂智刚)